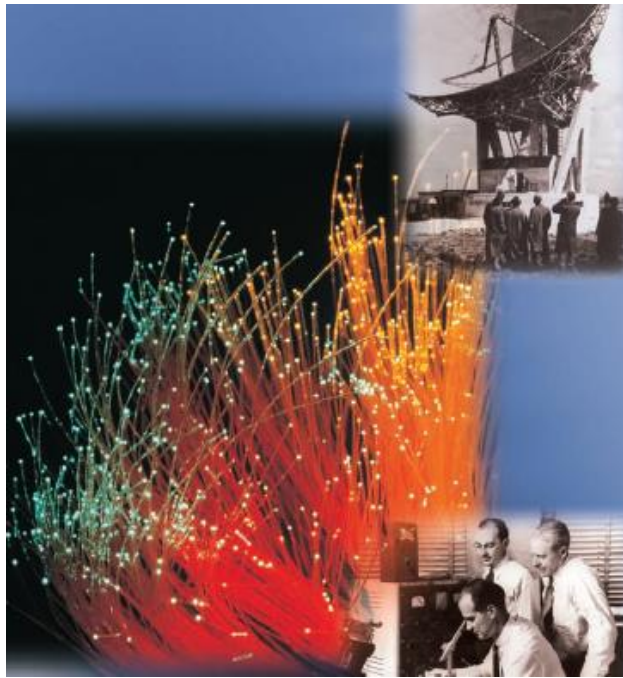


# Teoría de las Comunicaciones (a.k.a Redes )

**Claudio Enrique Righetti**  
*Segundo Cuatrimestre del 2014*

**Departamento de Computación**  
**Facultad de Ciencias Exactas y Naturales**  
**Universidad de Buenos Aires**  
**Argentina**



# Introducción

## Fundamentos

Imagen de la tapa del libro **A Brief History of Communications** IEEE Communications Society -  
A Fifty Year Foundation for the Future 1952-2002

*“Cuando se proclamó que la Biblioteca abarcaba todos los libros, la primera impresión fue de extravagante felicidad.*

*Todos los hombres se sintieron señores de un tesoro intacto y secreto. No había problema personal o mundial cuya elocuente solución no existiera: en algún hexágono.”*

Jorge Luis Borges, « La Biblioteca de Babel »

# Agenda ( Clase 12-Agosto-2014)

---

- ▶ Presentación
- ▶ La red eléctrica , la red telefónica.
- ▶ Los grandes paradigmas: Conmutación de Circuitos vs Conmutación de Paquetes
- ▶ Multiplexación: en el Tiempo , Frecuencia y “Estadística”
- ▶ Arquitectura de Redes: Modelo de Referencia OSI-ISO – TCP/IP
- ▶ Algunas palabras claves ...

# Agenda ( Clase 12-Agosto-2014)

---

- ▶ Presentación
- ▶ La red eléctrica , la red telefónica.
- ▶ Los grandes paradigmas: Conmutación de Circuitos vs Conmutación de Paquetes
- ▶ Multiplexación: en el Tiempo , Frecuencia y “Estadística”
- ▶ Arquitectura de Redes: Modelo de Referencia OSI-ISO – TCP/IP
- ▶ Algunas palabras claves ...

# Bibliografía

---

- ▶ Andrew S. Tanenbaum and David J. Wetherall. 2010. *Computer Networks* (5th ed.). Prentice Hall Press, Upper Saddle River, NJ, USA

Los capítulos I ( Introducción ) y II ( Nivel Físico)

- ▶ Larry L. Peterson and Bruce S. Davie. 2011. *Computer Networks, Fifth Edition: A Systems Approach* (5th ed.). Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA.
- ▶ Abramson Norman Information .1963.Theory and Coding . First edition McGraw Hill, USA.

Este libro es sobre teoría de la Información y codificación, sus primeros capítulos son el texto oficial de la materia para estos temas. Versión en español: Teoría de la Información y Codificación, Paraninfo, 1986

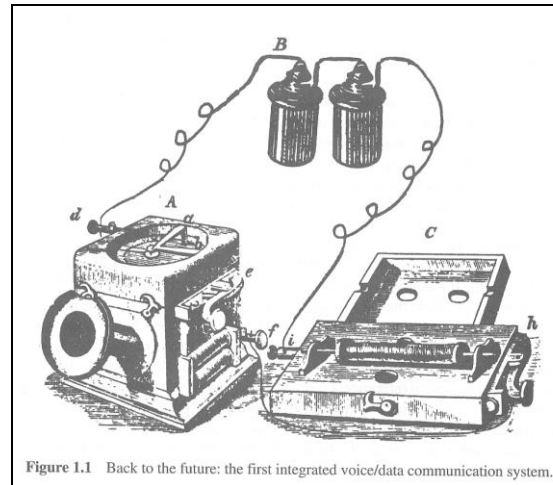
# Y fue el telégrafo ....

---

- ▶ Samuel Morse y su Código

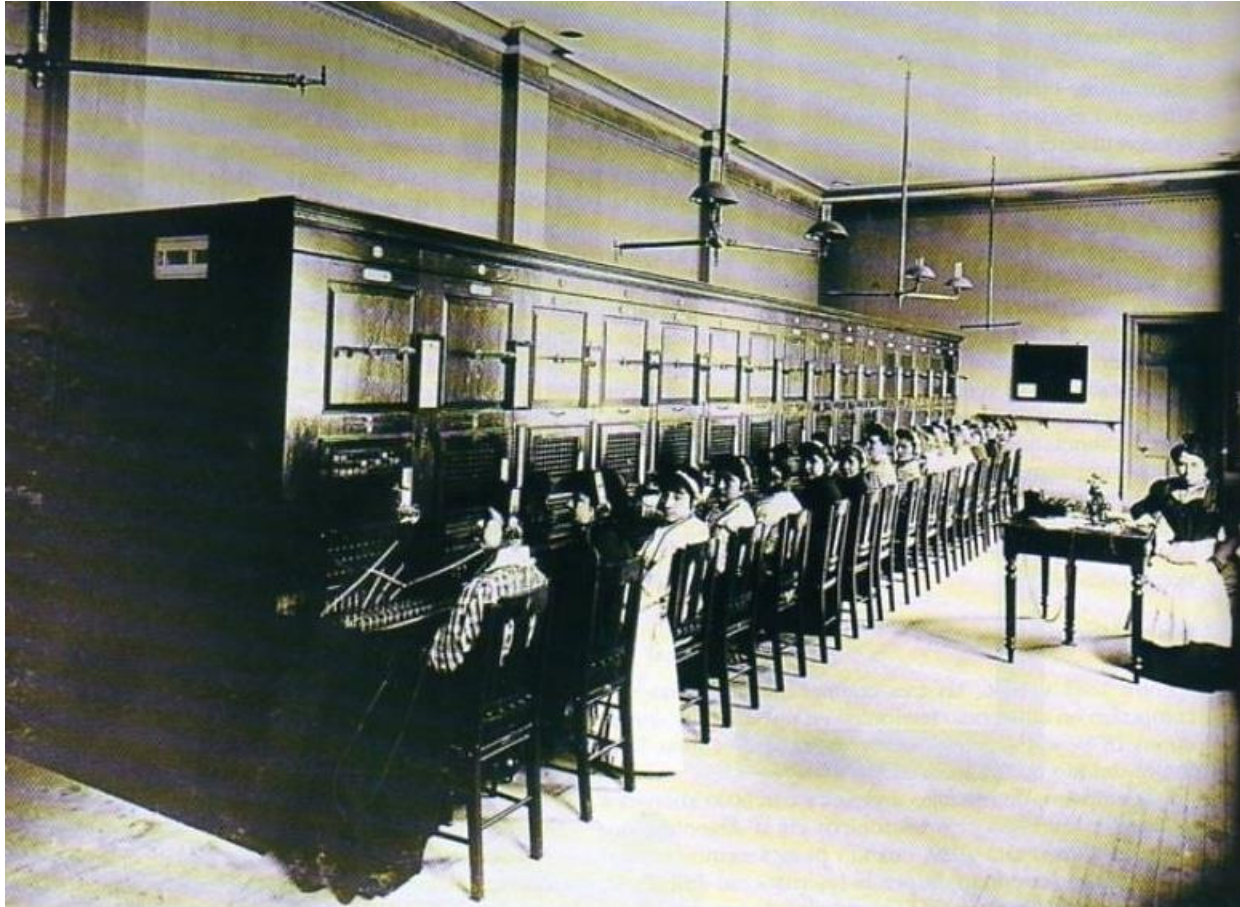


- ▶ Y llegamos al teléfono



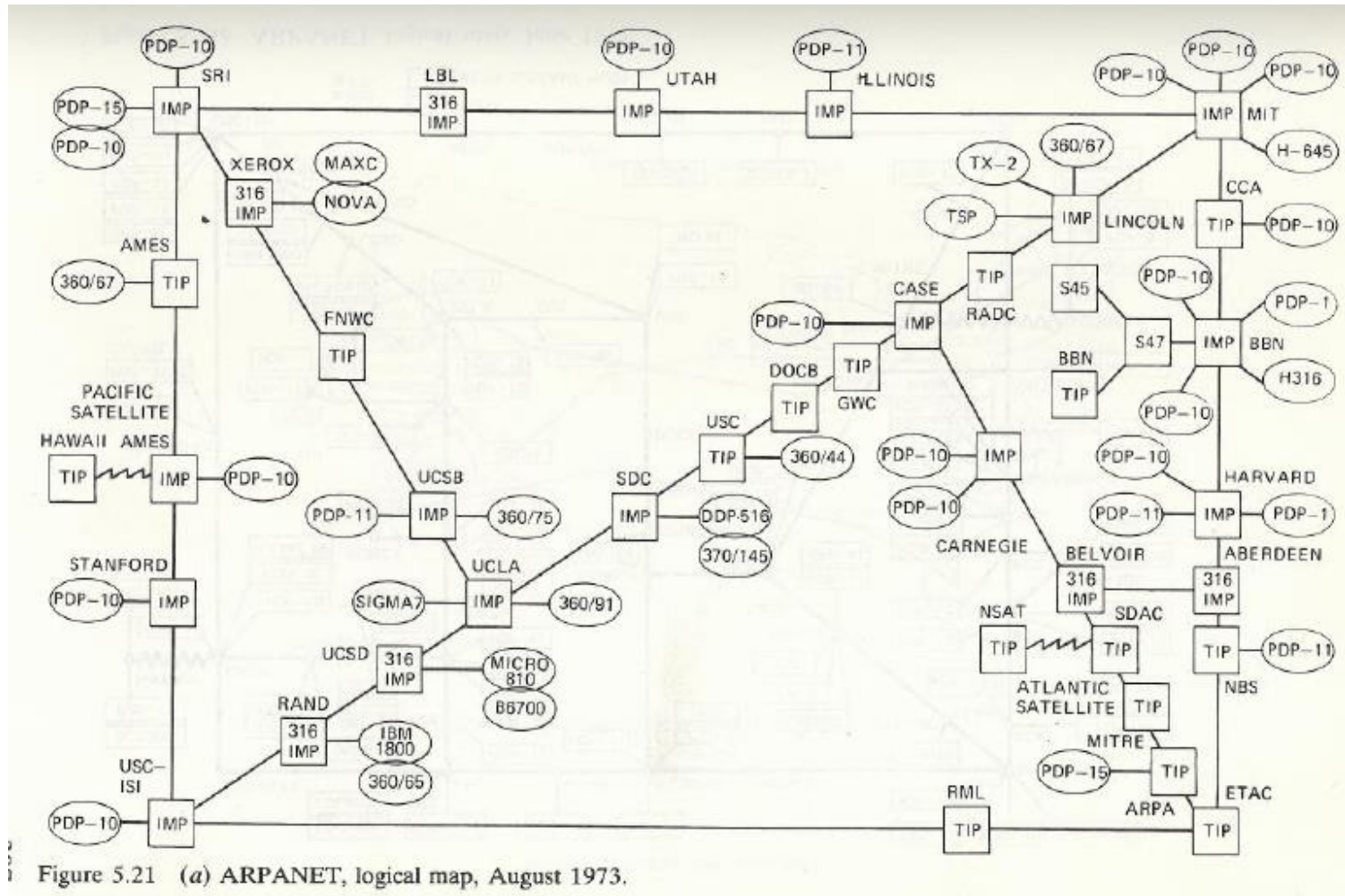
# Central de conmutación de circuitos

---





# Inicios de la conmutación de paquetes.....



# Algunos Trabajos fundacionales ....

---

- ▶ Kleinrock, L. "Models for Computer Networks", Conference Record, *IEEE International Conference on Communications*, Boulder, Colorado, pp. 21-9 to 21-16, June 1969
- ▶ Kleinrock, L. and W. Naylor, "On Measured Behavior of the ARPA Network", *AFIPS Conference Proceedings, Vol. 43, National Computer Conference*, Chicago, Illinois, May 1974, AFIPS Press, Montvale, New Jersey, pp. 767-780, 1974

# MODELS FOR COMPUTER NETWORKS<sup>†</sup>

Leonard Kleinrock  
Associate Professor  
School of Engineering and Applied Science  
University of California at Los Angeles  
Los Angeles, California 90024

## Abstract

The important task of predicting performance of computer networks is considered. In this initial approach, both mathematical and simulation models are described, and the results obtained are compared so as to identify their differences. Suggestions are made with regard to creating more sophisticated mathematical models which will predict more accurately the behavior of computer networks. The driving force which motivates this analysis is the experimental computer network currently being implemented through the efforts of the Advanced Research Projects Agency in the Department of Defense.

## I. Introduction

Computer networks are not new. SAGE<sup>1</sup> was one of the first as was the American Airlines reservation system.<sup>2</sup> Numerous military nets have been created and, of course, there is the huge electronically-switched telephone system. Recently CDC announced their nationwide com-

continental United States. The computers located at each of the nodes are highly incompatible (e.g. S.D.S. 940, DEC PDP-10, IBM 360/67, UNIVAC 1108, GE 635, ILLIAC 4, TX-2, etc.), and one of the major challenges is to design a network in which this assortment of varied hardware and software systems can communicate and cooperate with each other. The principle motivation for creating this network is to provide to each of the computer research centers those special resources which have been created at the other centers. For example, Stanford Research Institute will provide the role of network librarian and will offer its sophisticated text editing capability for massaging this vast data base; University of Illinois will allow access to the extremely high parallel processing speeds of its ILLIAC 4; University of Utah will serve as a major graphics center for picture processing; University of California at Los Angeles will process network measurement data and compare these to simulation and analytically predicted results.

### References

1. R.R. Everett, C.A. Zrakat, and H.D. Benington, "SAGE: A Data Processing System for Air Defense," *EJCC*, pp. 148-155, 1957.
2. J. Evans, "Experience Gained from the American Airlines SABRE System Control Program," *Proc. ACM National Meeting* August 1967, pp. 77-83.

# Que viene .....

---

- ▶ Comunicaciones cuánticas
- ▶ SDN
- ▶ Cloud
- ▶ HTML 5
- ▶ HEVC
- ▶ “Internet de las Cosas”

“La mayoría de las comunicaciones telefónicas se realizan actualmente mediante celulares, y las redes de datos y voz aun tienen infraestructuras diferentes .Pero es probable que a finales del 2020 termine esta convergencia y se unifique una red global basada en Internet, y todas las llamadas viajarán por la red. Entonces, desde cualquier dispositivo conectado podremos realizar, por ejemplo, videollamadas en forma masiva. Las estimaciones son que habrá unos 50.000 millones de dispositivos en red, que nos brindaran información sobre condiciones de seguridad de nuestro hogar, parámetros vitales de nuestros ancianos, historia médica, entre otros aspectos”

[http://web.clarin.com/sociedad/evolucion-mira-Internet\\_0\\_892710831.html](http://web.clarin.com/sociedad/evolucion-mira-Internet_0_892710831.html)

---

# Que viene .....IoE

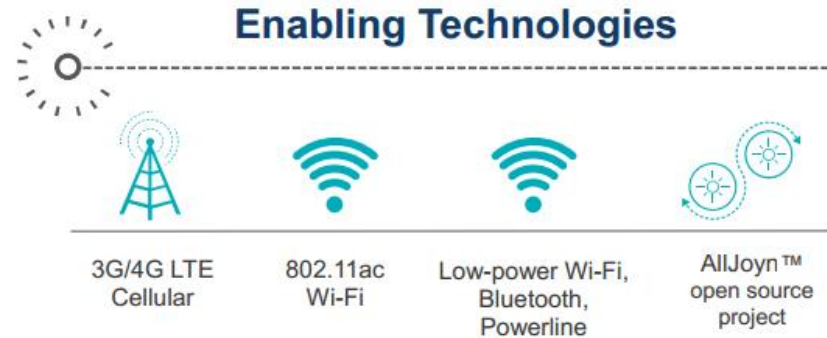
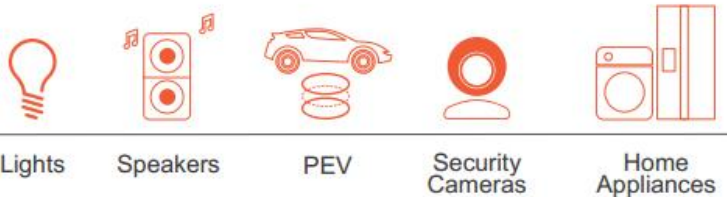
The Internet of Everything is here

Massive surge in connected things has already begun

# 25B

permanently connected things by 2020\*

Over half of these devices will be non-handsets



\*Source: Machina Research, 2013

AllJoyn is a trademark of Qualcomm Innovation Center, Inc. AllJoyn was initially developed by Qualcomm Innovation Center, Inc., and is now hosted by the AllSeen Alliance.

© 2014 Qualcomm Connected Experiences, Inc. All rights reserved.



# Que viene .....IoE

The Internet of Everything is here

Massive surge in connected things has already begun

# 25B

permanently connected things by 2020\*

Over half of these devices will be non-handsets



Lights



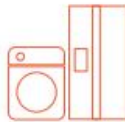
Speakers



PEV



Security  
Cameras



Home  
Appliances



## Enabling Technologies



3G/4G LTE  
Cellular



802.11ac  
Wi-Fi



Low-power Wi-Fi,  
Bluetooth,  
Powerline



AllJoyn™  
open source  
project

\*Source: Machina Research, 2013

AllJoyn is a trademark of Qualcomm Innovation Center, Inc. AllJoyn was initially developed by Qualcomm Innovation Center, Inc., and is now hosted by the AllSeen Alliance.

© 2014 Qualcomm Connected Experiences, Inc. All rights reserved.

# Que viene .....IoE

## IoT Application Examples



Transport & Logistics



Smart Home



Smart Cities



Smart Energy / Smart Grid



Retail



Smart Factories



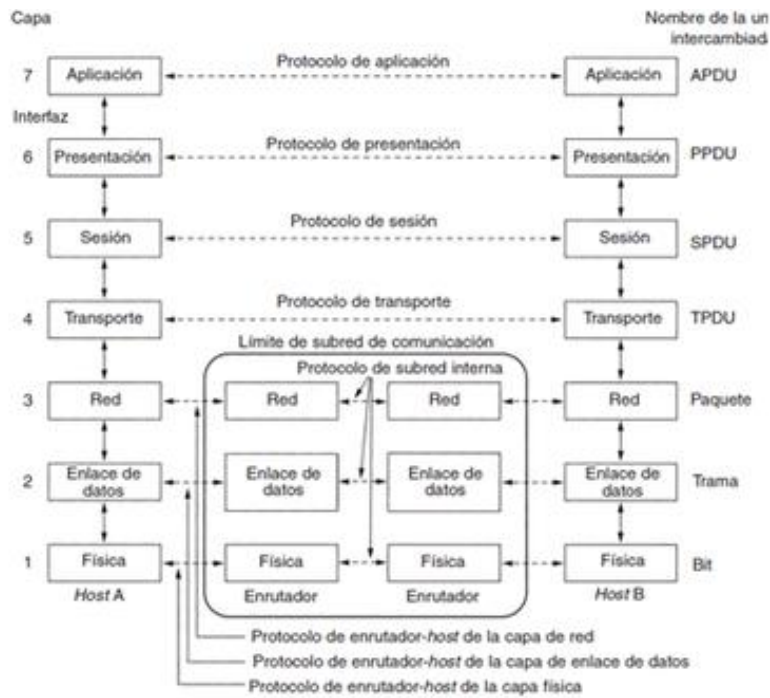
E-Health



External Use | 13

Source: Examples presented in  
"Enabling Things to Talk", Bassi et. al.



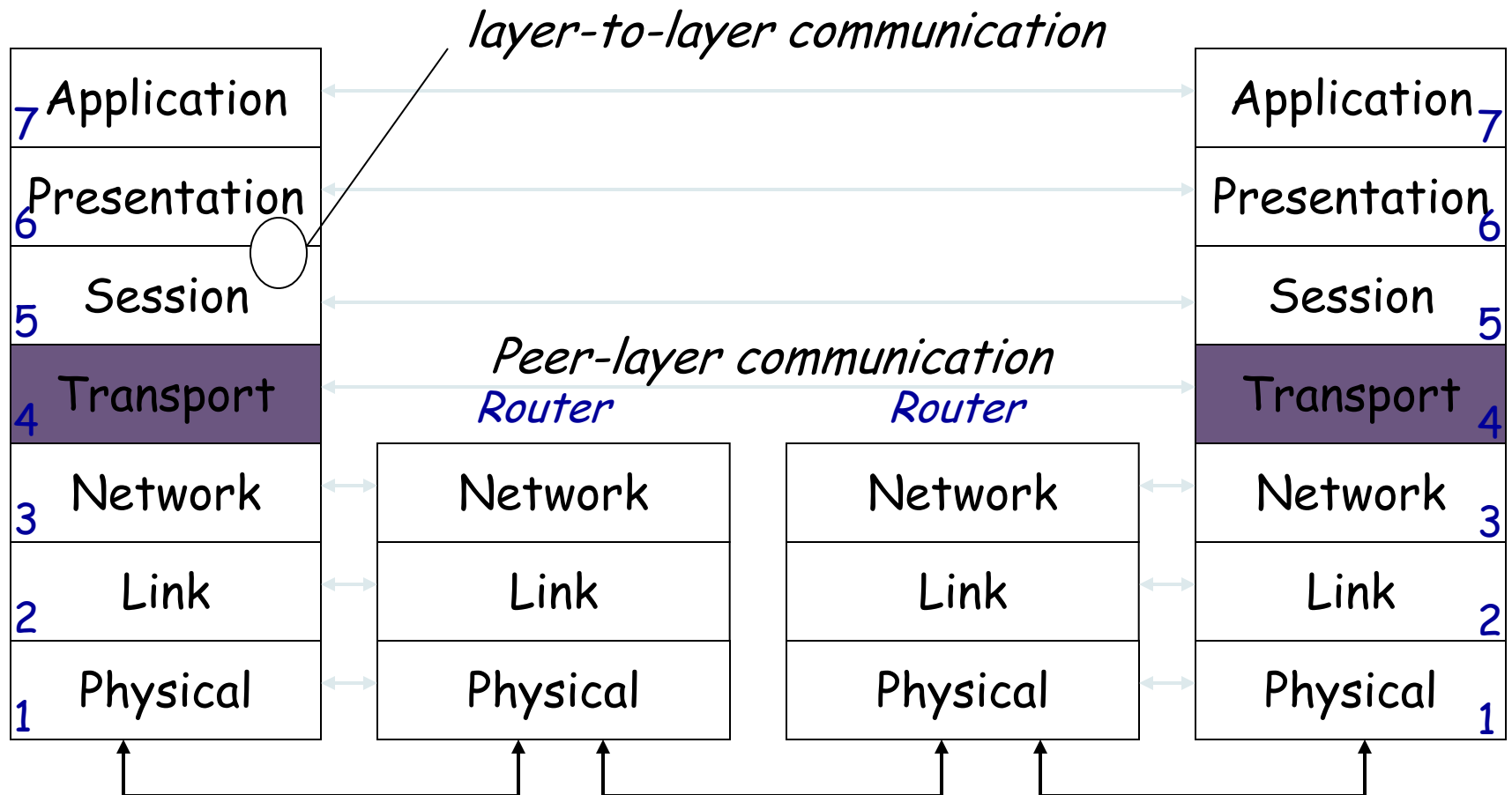


# Arquitectura de Redes

## Fundamentos



# Modelo OSI





# Nivel Físico

## 1 Parte - Fundamentos

# Agenda ( Clase 12-Agosto-2013)

---

- ▶ Modelo de Sistema de Comunicaciones
- ▶ Mundo Analógico y Digital
- ▶ Fundamentos de las señales
- ▶ En el dominio de la frecuencia –Fourier – Ancho de Banda
- ▶ Introducción Teoría de la Información

# Sistema de Comunicaciones

---

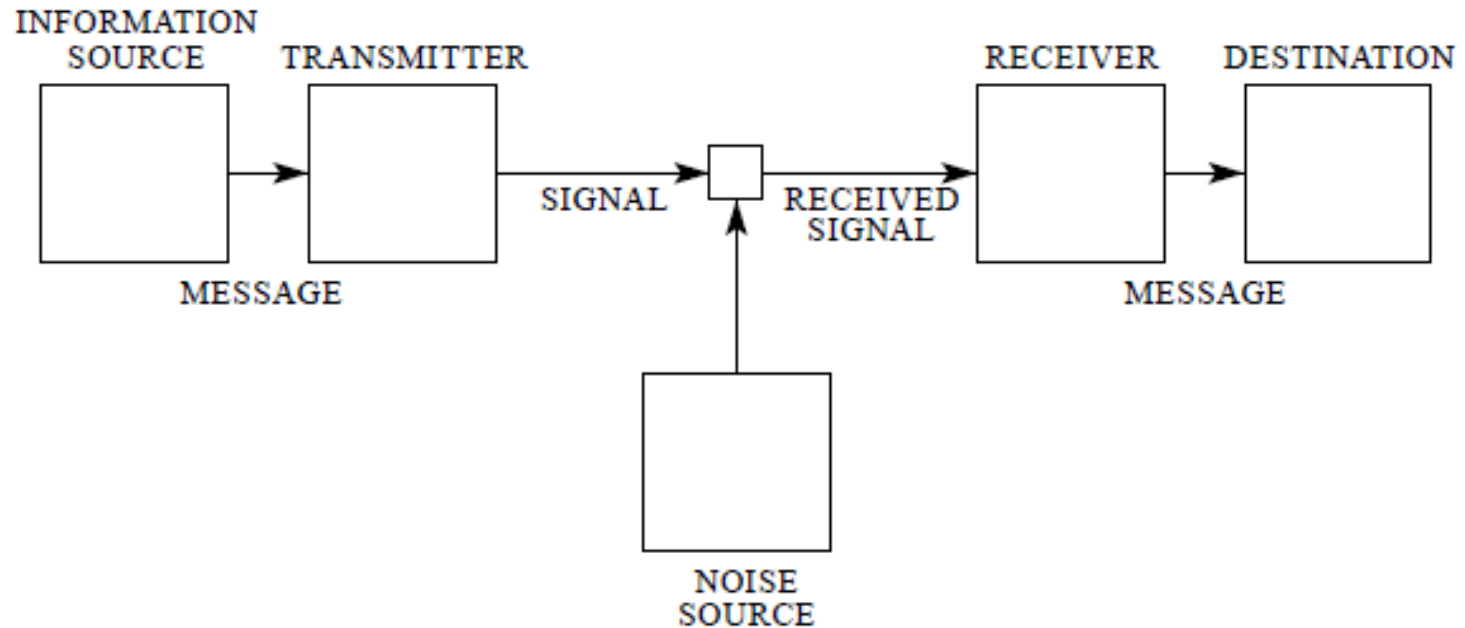
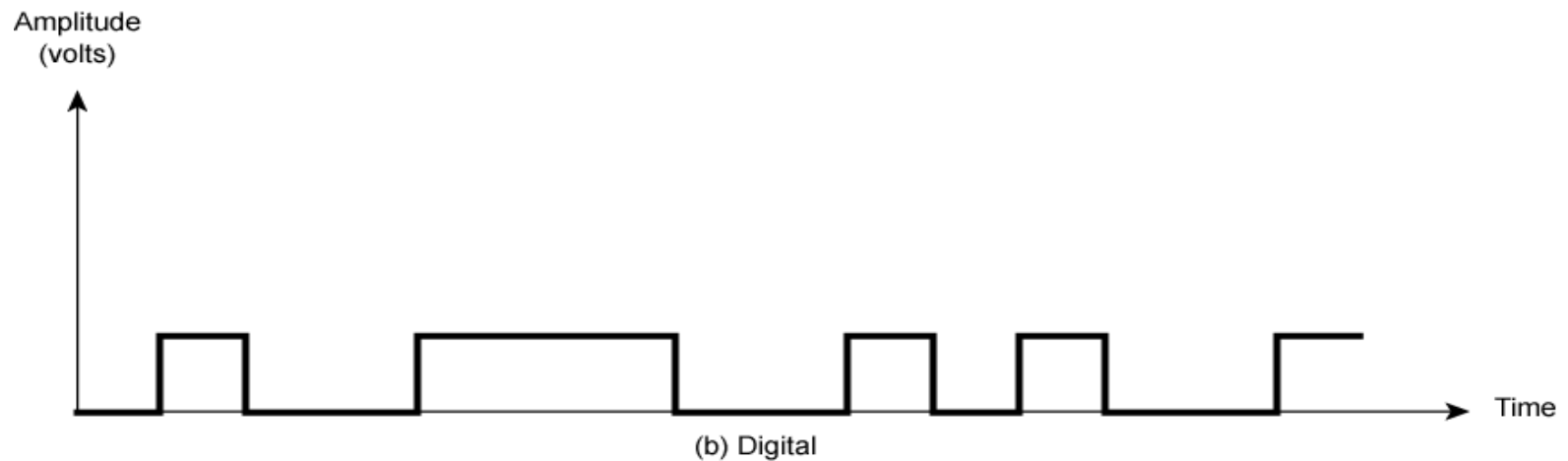
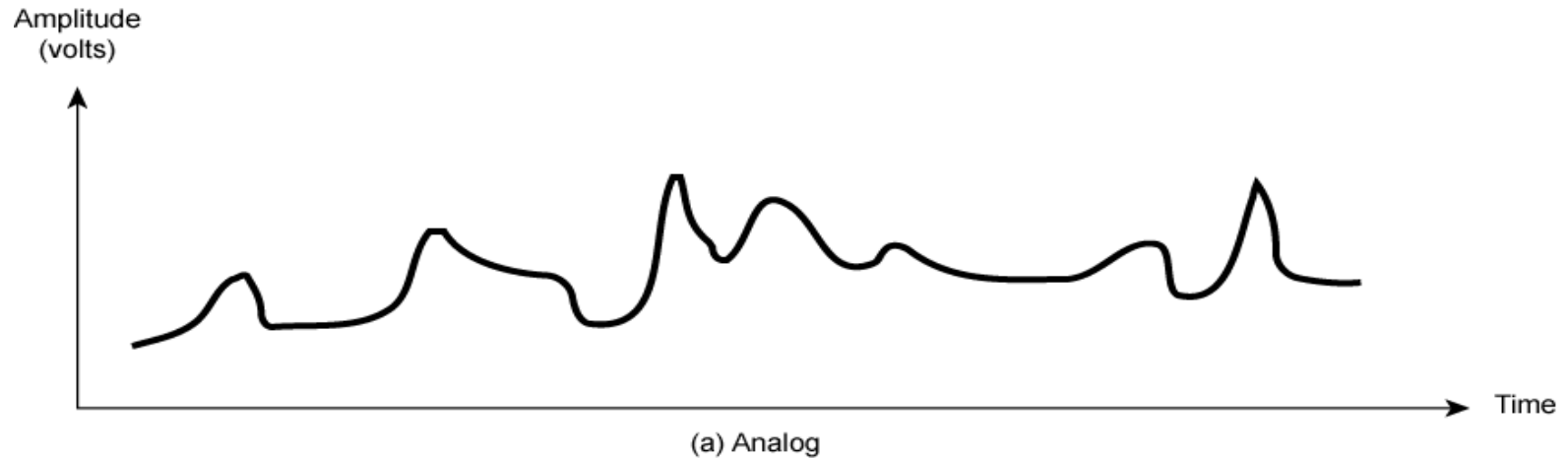


Fig. 1—Schematic diagram of a general communication system.

# Señales : Analógicas y Digitales

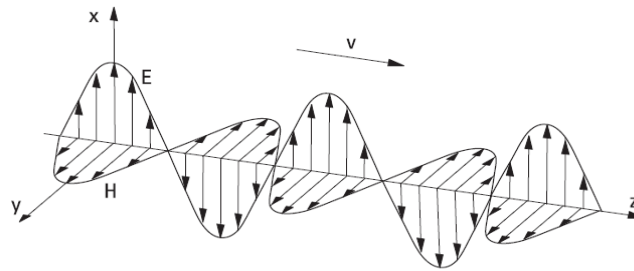
---



# Fundamentos de las Señales

---

- ▶ Son ondas electromagnéticas, dos campos ortogonales uno eléctrico y el otro magnético..



- ▶ Dichas ondas en el vacío se propagan a la velocidad de la luz ( Michelson-Morley demostraron que no existía el éter )
- ▶ La luz puede considerarse una onda electromagnética .

# Conceptos básicos: ondas

---

- ▶ **Onda electromagnética:** es un campo eléctrico magnético que se propaga por un medio a una velocidad propia de éste (por ejemplo en el caso del aire, la velocidad de propagación es la misma que la velocidad de la luz  $c=10^8$  m/s), vibrando a una frecuencia determinada (como un plano desplazándose en longitudinal), con un comportamiento periódico en el eje longitudinal de su propagación, con periodo o repetición a longitudes constantes, que se llaman longitudes de onda ( $\lambda$ ) y se define  $\lambda = c/f$ , siendo  $c$  la velocidad de la luz y  $f$  la frecuencia de oscilación.
- ▶ **Problemas:** Esta onda, en el caso de chocar con alguna imperfección puede producir reflexiones, y además, si el medio tiene muchas pérdidas, se puede atenuar.

# Conceptos básicos: funciones periódicas

---

- Una **función periódica**  $f(t)$  cumple que para todo valor de  $t$ :

$$f(t) = f(t + T).$$

Al valor mínimo, mayor que cero, de la constante  $T$  que cumple lo anterior se le llama el **periodo fundamental** (o simplemente periodo) de la función.

Observa que:

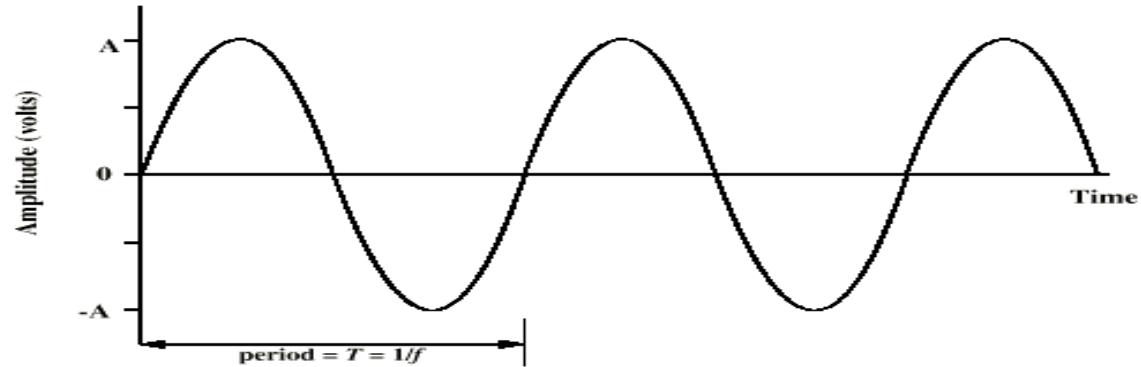
$$f(t) = f(t + nT), \text{ donde } n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$$

- Es  $f(t) = \text{cte.}$  una función periódica?

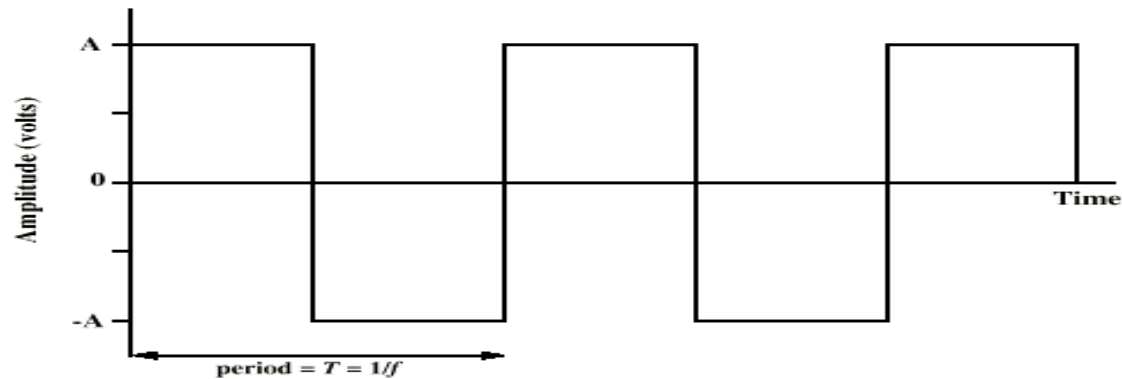


# Señales Periódicas

---

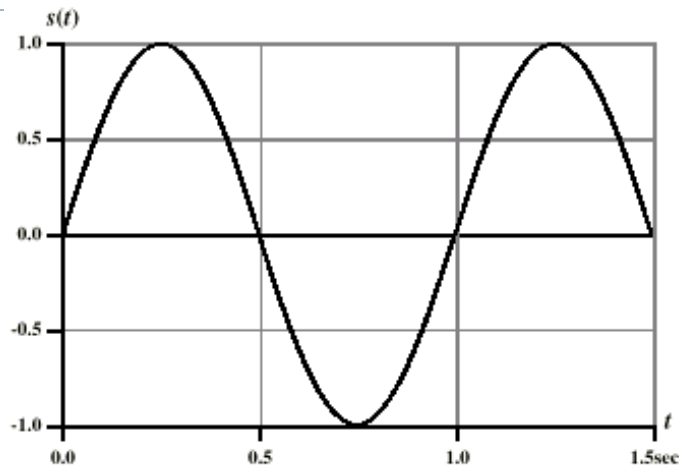


(a) Sine wave

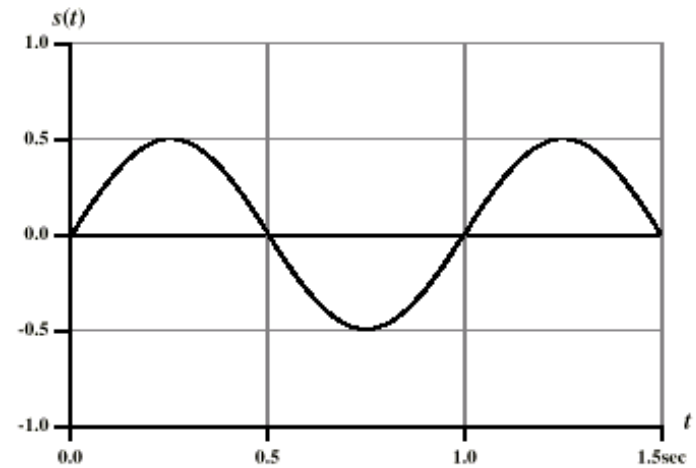


(b) Square wave

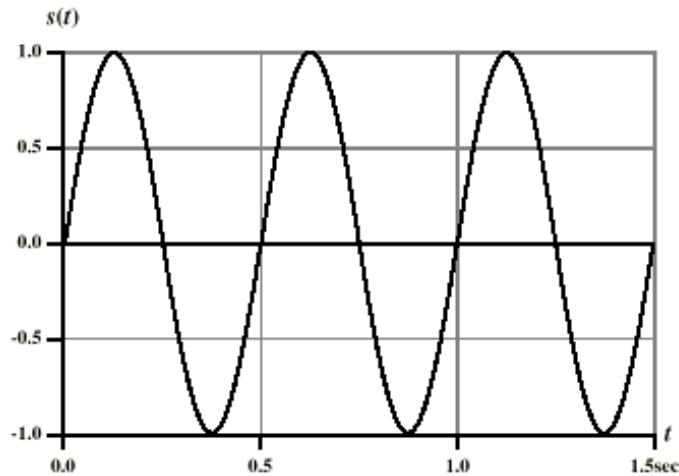
$$s(t) = A \sin(2\pi f t + \Phi)$$



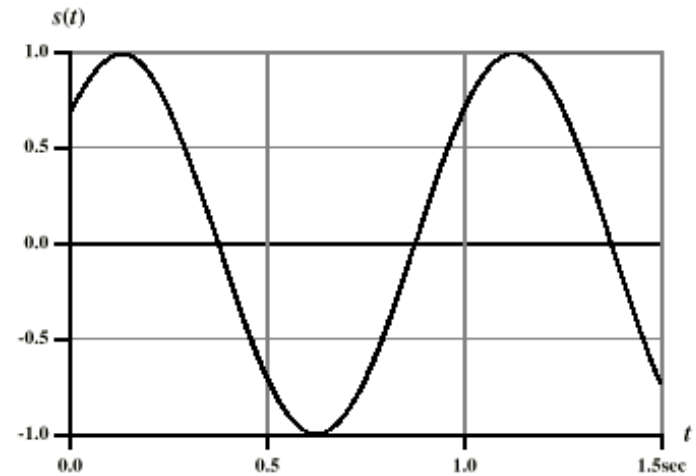
(a)  $A = 1, f = 1, \phi = 0$



(b)  $A = 0.5, f = 1, \phi = 0$



(c)  $A = 1, f = 2, \phi = 0$



(d)  $A = 1, f = 1, \phi = \pi/4$

# Onda Senoidal

---

- ▶ A (Amplitud) : CA , 310 V valor eficaz = 220 Volt
  - ▶ Amplitud
  - ▶ E.j. volts
- ▶ Frecuencia Angular  $\omega = 2\pi f$ 
  - ▶ Frecuencia
    - Hertz (Hz) o ciclos por segundo
    - Periodo = tiempo en que se completa un conjunto de valores (T)
    - $T = 1/f$
- ▶ Fase ( $\phi$ )
  - ▶ Posición relativa en el tiempo

# Longitud de Onda ( $\lambda$ )

---

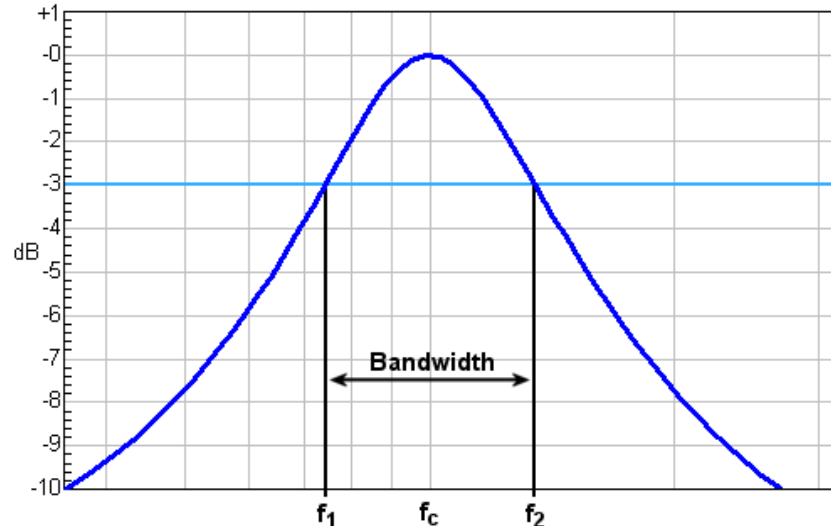
- ▶ “Distancia ocupada” por un ciclo
- ▶ Distancia entre dos puntos correspondientes a fases en dos ciclos consecutivo

En una onda *electromagnética*

- ▶ Asumimos una velocidad de propagación  $v$ 
  - ▶  $\lambda = vT$
  - ▶  $\lambda f = v$
  - ▶  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$  (velocidad de la luz en el vacío)
  - ▶  $\lambda = c/f$

# Ancho de Banda

- Recordar “experimento” en el pizarrón , con una señal senoidal !!!!



Formalmente las frecuencias de corte es donde se produce una atenuación de -3 dB , la próxima clase veremos atenuación

# El dominio transformado

---

Hasta ahora las señales las hemos representado analizado en el dominio del tiempo , sin embargo para comprender y/o simplificar la resolución de fenómeno o problema es conveniente pasar del dominio temporal al de la frecuencia.

Veremos dos herramientas :

1. Serie de Fourier
2. Transformada de Fourier



# Serie trigonométrica de Fourier

---

- Funciones periódicas  $f(t)$  de periodo  $T$  pueden expresarse por la siguiente serie, llamada *serie trigonométrica de Fourier*

$$f(t) = \frac{1}{2} a_0 + a_1 \cos(\omega_0 t) + a_2 \cos(2\omega_0 t) + a_3 \cos(3\omega_0 t) + \dots \\ \dots + b_1 \text{sen}(\omega_0 t) + b_2 \text{sen}(2\omega_0 t) + b_3 \text{sen}(3\omega_0 t) + \dots$$



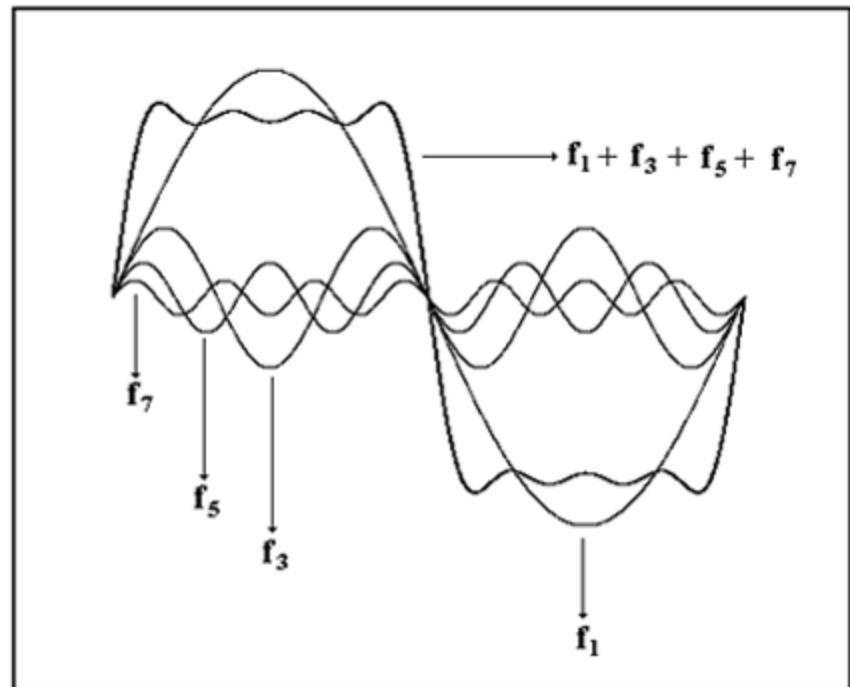
- Donde  $\omega_0 = 2\pi/T$  se denomina frecuencia fundamental.

$$f(t) = \frac{1}{2} a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega_0 t) + b_n \text{sen}(n\omega_0 t)]$$



# La onda Cuadrada

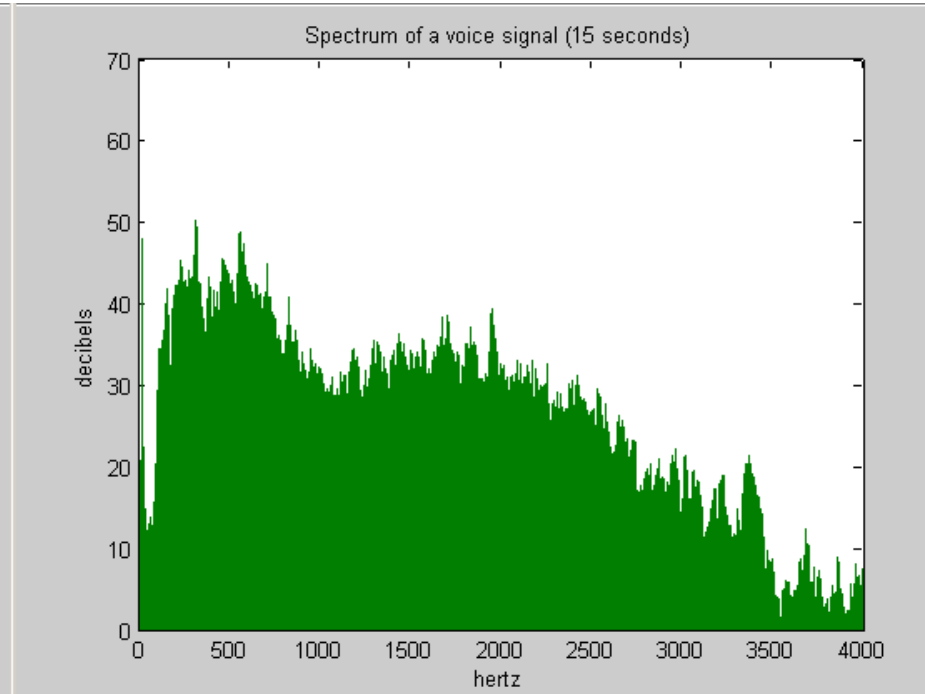
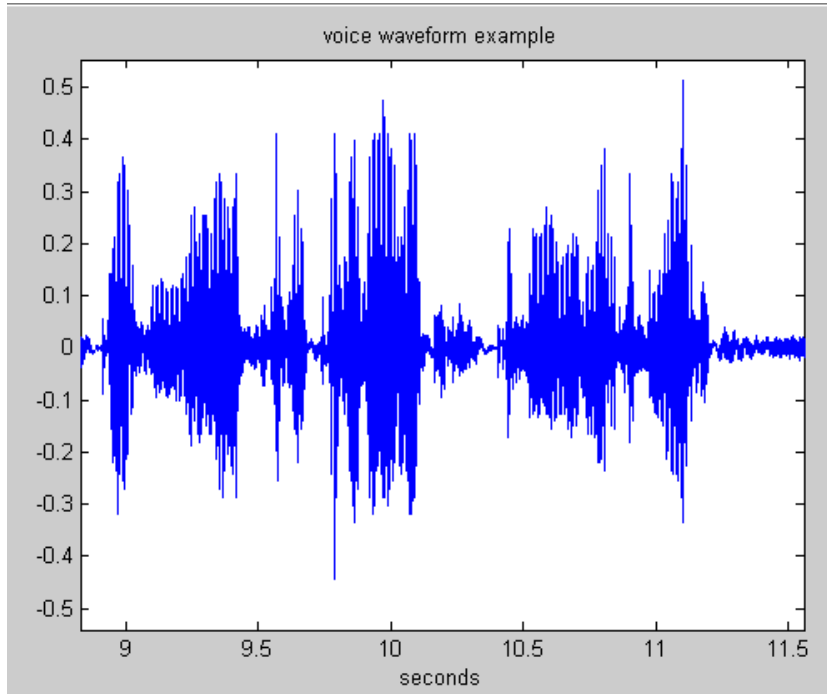
- ▶ Se puede representar como una serie de senoides armónicamente relacionadas
  - ▶ fundamental
  - ▶  $1/3$  tercera armónica
  - ▶  $1/5$  quinta armónica
  - ▶  $1/7$  séptima armónica
  - ▶  $1/9$  novena armónica
  - ▶ etc....



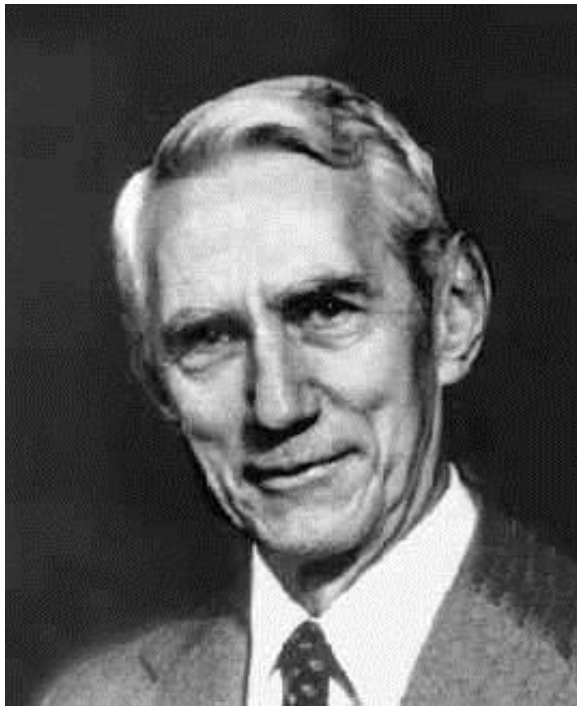


# Una señal vocal....

---



En el dominio del tiempo y de la frecuencia



# Teoría de la Información y Codificación

Introducción

Claude Shannon

# Teoría de la Información

---

Claude Shannon estableció la Teoría de la Información Clásica (o también los que algunos denominan teoría estadística de la información, otra teoría sería la algorítmica ..)

Dos Teoremas Fundacionales:

1. Codificación para un fuente sin ruido
2. Codificación para un canal ruidoso

# Teoría de Shannon

---

Uno de ellos describe la máxima eficiencia posible de un método de corrección de errores ( codificación ) frente a los niveles de ruido y de corrupción de los datos. No dice nada sobre como implementar dicha codificación . En definitiva brinda el limite para la TX de bits (basándose en la Ley de los Grandes Números )

# Shannon , paper Bell Labs (1948)

## A Mathematical Theory of Communication

By C. E. SHANNON

The choice of a logarithmic base corresponds to the choice of a unit for measuring information. If the base 2 is used the resulting units may be called binary digits, or more briefly *bits*, a word suggested by J. W. Tukey. A device with two stable positions, such as a relay or a flip-flop circuit, can store one bit of information.  $N$  such devices can store  $N$  bits, since the total number of possible states is  $2^N$  and  $\log_2 2^N = N$ . If the base 10 is used the units may be called decimal digits. Since

$$\begin{aligned}\log_2 M &= \log_{10} M / \log_{10} 2 \\ &= 3.32 \log_{10} M,\end{aligned}$$

to or are correlated according to some system with certain physical or conceptual entities. These semantic aspects of communication are irrelevant to the engineering problem. The significant aspect is that the actual message is one *selected from a set* of possible messages. The system must be designed to operate for each possible selection, not just the one which will actually be chosen since this is unknown at the time of design.

If the number of messages in the set is finite then this number or any monotonic function of this number can be regarded as a measure of the information produced when one message is chosen from the set, all choices being equally likely. As was pointed out by Hartley the most natural choice is the logarithmic function. Although this definition must be generalized considerably when we consider the influence of the statistics of the message and when we have a continuous range of messages, we will in all cases use an essentially logarithmic measure.

C. E. Shannon, Bell System Technical Journal, vol. 27, pp. 379-423 and 623-656, July and October, 1948

---

*A method is developed for representing any communication system geometrically. Messages and the corresponding signals are points in two “function spaces,” and the modulation process is a mapping of one space into the other. Using this representation, a number of results in communication theory are deduced concerning expansion and compression of bandwidth and the threshold effect. Formulas are found for the maximum rate of transmission of binary digits over a system when the signal is perturbed by various types of noise. Some of the properties of “ideal” systems which transmit at this maximum rate are discussed. The equivalent number of binary digits per second for certain information sources is calculated.“*

C. E. Shannon (January 1949). "Communication in the presence of noise" *Proc. Institute of Radio Engineers* vol. 37 (1): 10–21.

---

The recent development of various methods of modulation such as **PCM** and **PPM** which exchange bandwidth for signal-to-noise ratio has intensified the interest in a general theory of communication. A basis for such a theory is contained in the important papers of **Nyquist** and **Hartley** on this subject. In the present paper we will extend the theory to include a number of new factors, in particular the effect of noise in the channel, and the savings possible due to the statistical structure of the original message and due to the nature of the final destination of the information.

The fundamental problem of communication is that of reproducing at one point either exactly or approximately a message selected at another point. Frequently the messages have meaning; that is they refer to or are correlated according to some system with certain physical or conceptual entities. These semantic aspects of communication are irrelevant to the engineering problem. The significant aspect is that the actual message is one selected from a set of possible messages. The system must be designed to operate for each possible selection, not just the one which will actually be chosen since this is unknown at the time of design. If the number of messages in the set is finite then this number or any monotonic function of this number can be regarded as a measure of the information produced when one message is chosen from the set, all choices being equally likely. As was pointed out by Hartley the most natural choice is the logarithmic function. Although this definition must be generalized considerably when we consider the influence of the statistics of the message and when we have a continuous range of messages, we will in all cases use an essentially logarithmic measure.

# Información

---

**Definición.** Sea  $E$  un suceso que puede presentarse con probabilidad  $P(E)$ . Cuando  $E$  tiene lugar, decimos que hemos recibido

$$I(E) = \log \frac{1}{P(E)} \quad | \quad (2-1)$$

unidades de información.



# Definición : unidades

---

Si introducimos el logaritmo de base 2, la unidad correspondiente se denomina *bit* \*.

$$I(E) = \log_2 \frac{1}{P(E)} \quad \text{bits} \quad (2-3a)$$

Empleando logaritmos naturales, la unidad de información recibe el nombre de *nat* \*\*.

$$I(E) = \ln \frac{1}{P(E)} \quad \text{nats} \quad (2-3b)$$

En el caso de logaritmos de base 10, la unidad de información es el Hartley. R. V. Hartley fue quien primero sugirió la medida logarítmica de la información (Hartley, 1928).

$$I(E) = \log_{10} \frac{1}{P(E)} \quad \text{Hartleys} \quad (2-3c)$$

# 1 Bit

---

Notemos, también, que si  $P(E) = 1/2$ , será  $I(E) = 1$  bit. Es decir, *un bit es la cantidad de información obtenida al especificar una de dos posibles alternativas igualmente probables*. Esta situación se presenta al lanzar una moneda al aire o al examinar la salida de un sistema de comunicación binario.

# Fuente de memoria nula



FIG. 2-1. 'Fuente de información.

Imaginemos la fuente emitiendo una secuencia de símbolos pertenecientes a un alfabeto finito y fijo,  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_q\}$ . Los símbolos emitidos sucesivamente se eligen de acuerdo con una ley fija de probabilidad. Ocasionalmente nos referimos a la fuente misma como  $S$ ; sin que esto deba dar lugar a confusión. En la fuente más sencilla admitiremos que los símbolos emitidos son estadísticamente independientes. Tal fuente de información se conoce como *fuentes de memoria nula* y puede describirse completamente mediante el alfabeto fuente  $S$  y las probabilidades con que los símbolos se presentan:

$$P(s_1), P(s_2), \dots, P(s_q)$$

# Memoria nula (cont)

---

Puede calcularse la información media suministrada por una fuente de información de memoria nula en la forma siguiente: La presencia de un símbolo  $s_i$  corresponde a una cantidad de información igual a

$$I(s_i) = \log \frac{1}{P(s_i)} \quad \text{bits}$$

# Entropía

---

La probabilidad de que aparezca es precisamente  $P(s_i)$ , de modo que la cantidad *media* de información por símbolo de la fuente es

$$\sum_s P(s_i) I(s_i) \quad \text{bits}$$

donde  $\sum_s$  indica la suma extendida a  $q$  símbolos de la fuente  $S$ . Esta magnitud, cantidad media de información por símbolo de la fuente, recibe el nombre de *entropía*  $H(S)$  de la fuente de memoria nula\*.

$$H(S) \triangleq \sum_s P(s_i) \log \frac{1}{P(s_i)} \quad \text{bits} \quad , \quad (2-5a)$$

# Entropía (cont)

---

- ▶ La entropía de un mensaje  $X$ , que se representa por  $H(X)$ , es el *valor medio ponderado* de la cantidad de información de los diversos estados del mensaje.

$$H(X) = - \sum p(x) \log p(x)$$

- ▶ Es una medida de la incertidumbre media acerca de una variable aleatoria y el *número de bits de información*.
- ▶ El concepto de incertidumbre en  $H$  se puede asociar. La función entropía representa una medida de la incertidumbre, no obstante se suele considerar la entropía como la información **media suministrada por cada símbolo de la fuente**

# Entropía: Fuente Binaria

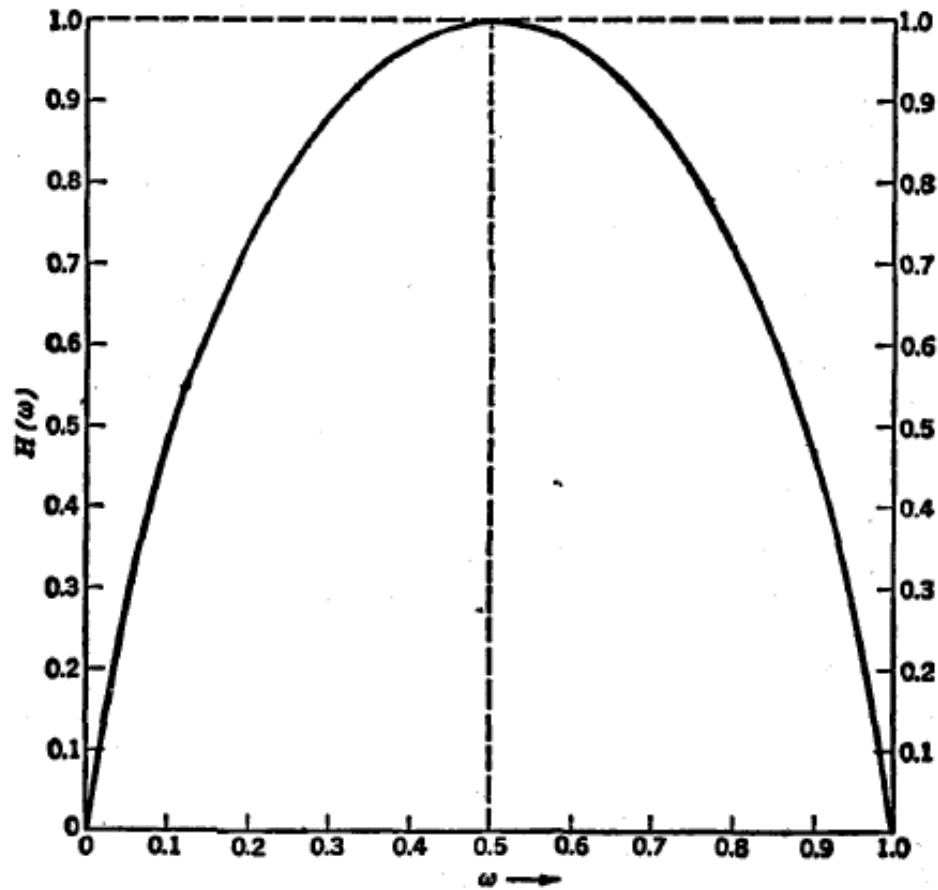


FIG. 2-3.  $H(\omega)$ , función entropía.

# Propiedades de la entropía

---

- a) La entropía es no negativa y se anula si y sólo si un estado de la variable es igual a 1 y el resto 0 .
- b) La entropía es máxima, mayor incertidumbre del mensaje, cuando todos los valores posibles de la variable  $X$  son equiprobables .

Si hay  $n$  estados equiprobables, entonces  $p_i = 1/n$ . Luego:

$$H(X) = - \sum_i p_i \log_2 p_i = - n(1/n) \log_2 (1/n) = - (\log_2 1 - \log_2 n)$$

$$H(X)_{\text{máx}} = \log_2 n$$



## Extensión de una Fuente de Memoria Nula

$$H(S^n) = n H(S) \quad (2-18)$$

**Ejemplo 2-2.** Consideremos la extensión de segundo orden de la fuente del ejemplo 2-1. Recordemos que la fuente tenía un alfabeto  $S = \{s_1, s_2, s_3\}$ , con  $P(s_1) = 1/2$  y  $P(s_2) = P(s_3) = 1/4$ . Así la fuente  $S^2$  tendrá los nueve símbolos siguientes:

Símbolos de $S^2$ ... ..	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$	$\sigma_4$	$\sigma_5$	$\sigma_6$	$\sigma_7$	$\sigma_8$	$\sigma_9$
Secuencia correspondiente a los símbolos de $S$ ... ..	$s_1s_1$	$s_1s_2$	$s_1s_3$	$s_2s_1$	$s_2s_2$	$s_2s_3$	$s_3s_1$	$s_3s_2$	$s_3s_3$
Probabilidad $P(\sigma_i)$ ... ..	1/4	1/8	1/8	1/8	1/16	1/16	1/8	1/16	1/16

$$\begin{aligned}
 H(S^2) &= \sum_{S^2} P(\sigma_i) \log \frac{1}{P(\sigma_i)} \\
 &= 1/4 \log 4 + 4 \times 1/8 \log 8 + 4 \times 1/16 \log 16 \\
 &= 3 \text{ bits/símbolo}
 \end{aligned}$$

# Fuente de Markov

---

$$P(s_i/s_{i_1}, s_{i_2}, \dots, s_{i_m}) \text{ para } i = 1, 2, \dots, q; i_v = 1, 2, \dots, \quad (2-19)$$

En una fuente de Markov de orden  $m$ , la probabilidad de un símbolo cualquiera viene determinada por los  $m$  símbolos que lo preceden. En cualquier momento, por lo tanto, definiremos el *estado* de la fuente de Markov de orden  $m$  por los  $m$  símbolos precedentes. Puesto que existen  $q$  símbolos distintos, una fuente de Markov de orden  $m$  admitirá  $q^m$  estados posibles. Al emitir la fuente nuevos símbolos, el estado cambia. Un procedimiento simple de estudiar el comportamiento de la fuente consiste en utilizar un *diagrama de estados*. En este diagrama cada uno de los  $q^m$  estados posibles de la fuente se repre-

---

presenta por un punto, indicándose mediante flechas las transiciones entre estados.

# Fuente de Markov (cont)

**Ejemplo 2-3.** Consideremos una fuente de Markov de segundo orden con un alfabeto binario  $S = \{0,1\}$ . Supongamos que las probabilidades condicionales son

$$P(0/00) = P(1/11) = 0.8.$$

$$P(1/00) = P(0/11) = 0.2.$$

$$P(0/01) = P(0/10) = P(1/01) = P(1/10) = 0.5$$

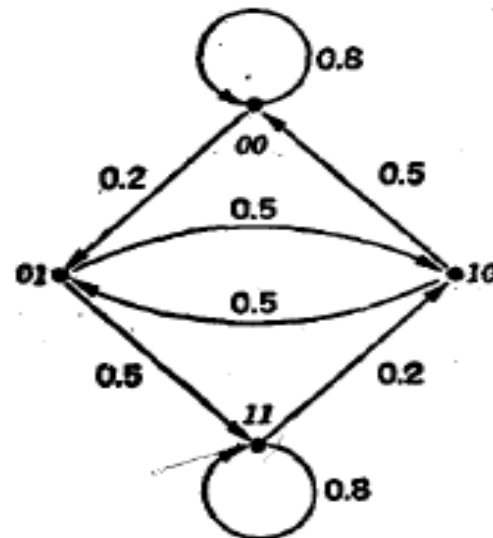


FIG. 2-4. Diagrama de estados de una fuente de Markov de segundo orden.

Consideremos un código instantáneo con un alfabeto fuente

$$S = \{s_1, s_2, \dots, s_q\}$$

y un alfabeto código  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_r\}$ . Sean  $X_1, X_2, \dots, X_q$  las palabras del código y, por definición,  $l_i$  la longitud (es decir, el número de símbolos del código) de la palabra  $X_i$ . Normalmente es interesante que las longitudes de las palabras del código sean lo más cortas posible. La condición necesaria y suficiente para que exista un código instantáneo con palabras de longitud  $l_1, l_2, \dots, l_q$ , viene definida por la *inecuación de Kraft* (Kraft, 1949).

La condición necesaria y suficiente para la existencia de un código instantáneo de longitudes  $l_1, l_2, \dots, l_q$  es que

$$\sum_{i=1}^q r^{-l_i} \leq 1$$

donde  $r$  es el número de símbolos diferentes que constituyen el alfabeto código.

En el caso de alfabeto binario, la inecuación de Kraft se transforma en

$$\sum_{i=1}^q 2^{-l_i} \leq 1 \quad (3-3)$$

donde la suma se extiende a todas las palabras del código bloque. Antes de probar esta inecuación, es interesante ver en qué forma puede

Los medios de transmisión....

.... Y las “perturbaciones” .....

# Modelo de un Sistema de Comunicaciones

---

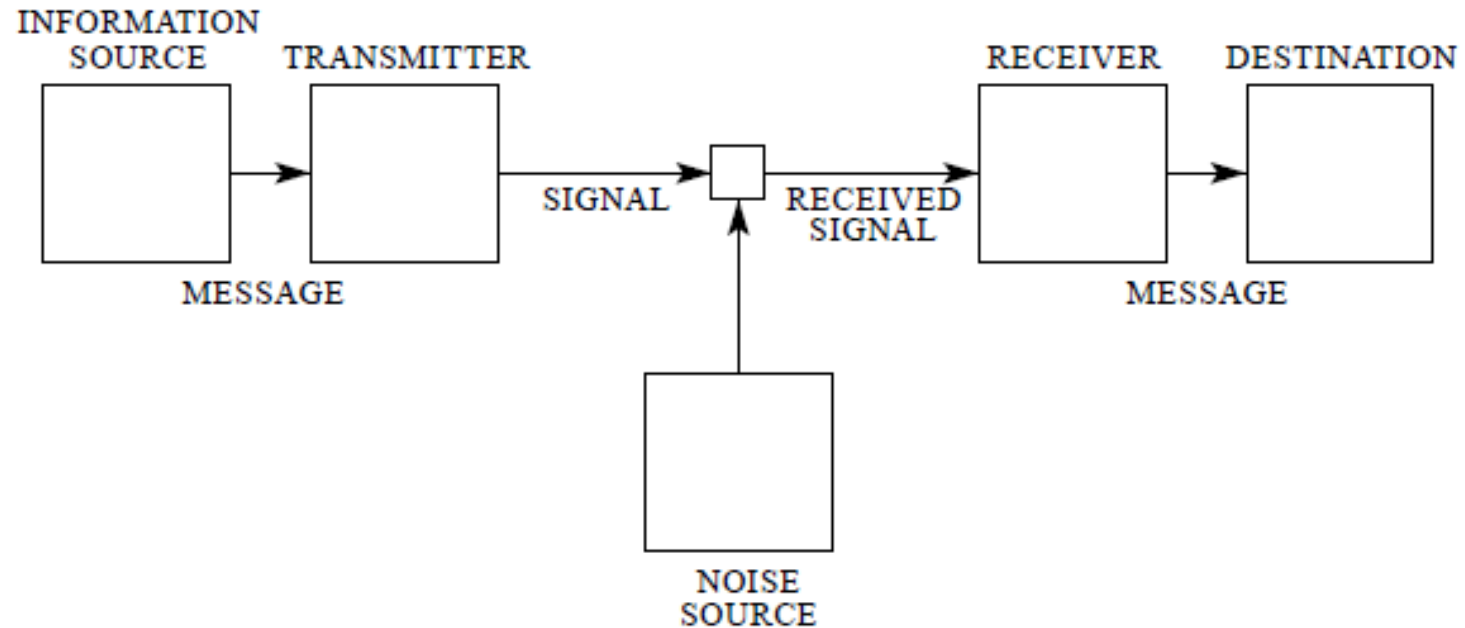


Fig. 1—Schematic diagram of a general communication system.

# Perturbaciones en la transmisión

---

- ▶ La señal recibida puede diferir de la señal transmitida
- ▶ Analógico - degradación de la calidad de la señal
- ▶ Digital – Errores de bits
- ▶ Causado por
  - ▶ Atenuación y distorsión de atenuación
  - ▶ Distorsión de retardo
  - ▶ Ruido

# Atenuación

---

- ▶ La intensidad de la señal disminuye con la distancia
- ▶ Depende del medio
- ▶ La intensidad de la señal recibida:
  - ▶ Debe ser suficiente para que se detecte
  - ▶ Debe ser suficientemente mayor que el ruido para que se reciba sin error
  - ▶ Crece con la frecuencia
- ▶ Ecualización: amplificar más las frecuencias más altas
- ▶ Problema “menos grave” para las señales digitales



# Distorsión de retardo

---

- ▶ Sólo en medios guiados
- ▶ La velocidad de propagación en el medio varía con la frecuencia
- ▶ Para una señal limitada en banda, la velocidad es mayor cerca de la frecuencia central
- ▶ Las componentes de frecuencia llegan al receptor en distintos instantes de tiempo, originando desplazamientos de fase entre las distintas frecuencias

# Ruido (1)

---

- ▶ Señales adicionales insertadas entre el transmisor y el receptor
- ▶ **Térmico**
  - ▶ Debido a la agitación térmica de los electrones
  - ▶ Aumenta linealmente con la temperatura absoluta ( $N_0 = kT$ )
  - ▶ Uniformemente distribuido en la frecuencia
  - ▶ Ruido blanco ( $N_{BW} = kTB$ )
- ▶ **Intermodulación**
  - ▶ Señales que son la suma y la diferencia de frecuencias originales y sus múltiplos ( $mf_1 \pm nf_2$ )
  - ▶ Se produce por falta de linealidad

# Ruido (2)

---

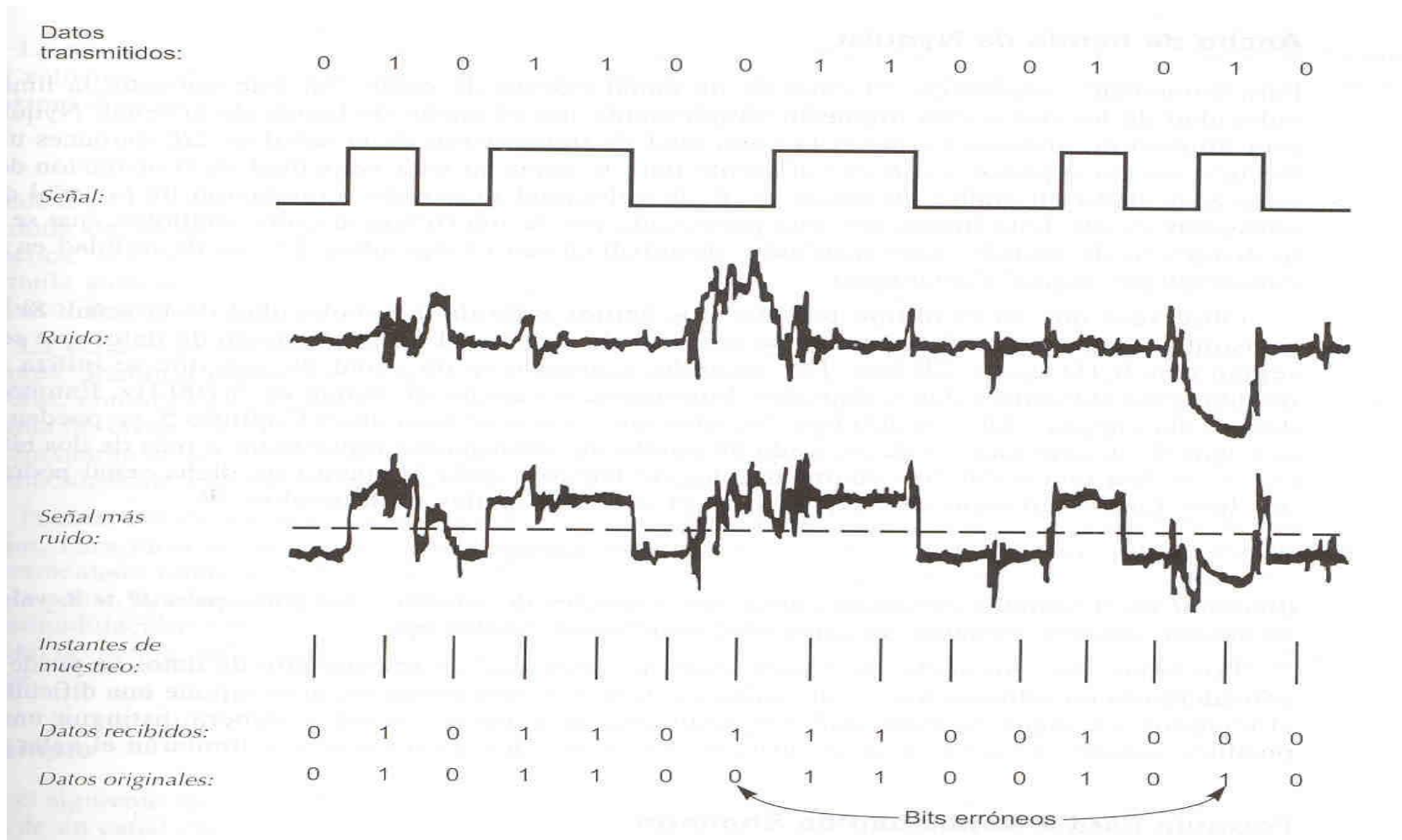
- ▶ **Diafonía**

- ▶ Una señal de una línea se mete en otra

- ▶ **Impulsivo**

- ▶ Impulsos irregulares o picos
  - ▶ Ej: Interferencia electromagnética externa (tormenta)
  - ▶ Corta duración
  - ▶ Gran amplitud

# Efecto del ruido en señal digital



# Conceptos relacionados con la capacidad del canal

---

- ▶ Velocidad de datos
  - ▶ En bits por segundo
  - ▶ Velocidad a la cual se pueden transmitir los datos
- ▶ Ancho de Banda
  - ▶ En ciclos por segundo (hertz)
  - ▶ Limitado por el transmisor y el medio
- ▶ Ruido, nivel medio a través del camino de transmisión
- ▶ Tasa de errores, cambiar 0 por 1 y viceversa (BER, Bit Error Rate)

# Ancho de Banda de Nyquist (Capacidad teórica máxima)

---

## Para 2 niveles SIN RUIDO

- ▶ Velocidad binaria

$$C(bps) = 2B(Hz)$$

## Para M niveles SIN RUIDO

- ▶ Velocidad binaria

$$C(bps) = 2B(Hz) \log_2 M(niveles)$$

- ▶ *1 Baudio = 1 estado señalización/seg ( también se expresa símbolos/seg )*
- ▶ *1 Baudio = 1 bps si M=2*
- ▶ *La relación entre la velocidad de transmisión C y la velocidad de modulación V es:*

$$C(bps) = V(baudios) \cdot \log_2 M$$

# Capacidad de Shannon (1)

---

- ▶ Para un cierto nivel de ruido, a mayor velocidad, menor período de un bit, mayor tasa de error (se pueden corromper 2 bits en el tiempo en que antes se corrompía 1 bit)
- ▶ Relación Señal / Ruido (Signal Noise Ratio, SNR) en dB

$$SNR_{dB} = 10\log(SNR) = 10\log \frac{\textit{Potencia \_ Señal}}{\textit{Potencia \_ Ruido}}$$

- ▶ Restricción: no se puede aumentar  $M$  cuanto se quiera porque debe cumplirse:

$$M \leq \sqrt{1 + SNR}$$

# Capacidad de Shannon (2)

---

- ▶ En principio, si se aumenta el ancho de banda **B** y la potencia de señal **S**, aumenta la velocidad binaria **C**.
- ▶ Pero:
  - ▶ Un aumento del ancho de banda **B** aumenta el ruido
  - ▶ Un aumento de potencia de señal **S** aumenta las no linealidades y el ruido de intermodulación
- ▶ Por tanto, la velocidad binaria teórica máxima será:

$$C(bps) = V \cdot \log_2 M = 2 \cdot B \cdot \log_2 M = B \cdot \log_2 M^2$$

$$\Rightarrow C_{\text{máx}}(bps) = B(Hz) \cdot \log_2 (1 + SNR)$$



# Ejemplo

---

- ▶ Canal entre 3 MHz y 4 MHz
- ▶ Relación señal ruido = 24 dB,  $SNR = 10^{2,4} = 251$

Calcular ancho de banda

- ▶ Respuesta:  **$B = 1$  MHz**
- ▶ Calcular la velocidad binaria teórica máxima y el número de niveles
  - ▶ Respuesta:  **$SNR = 251$**
  - ▶ Respuesta:  **$C = 8$  Mbps**
  - ▶ Respuesta:  **$M = 16$  niveles**